فصلنامه‌ی علمی پژوهشی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۹، شماره‌ی ۱، بهار ۱۳۹۹

مطالعه تاثیر افزودنی‌های CuO و CeO_2 بر خواص الکتریکی پیزوسرامیک‌های عاری از سرب $(Ba_{0.85}Ca_{0.15})(Zr_{0.1}Ti_{0.9})O_3$

نوع مقاله: علمی پژوهشی

راضیه حیاتی[۱]، مینا توانگر[۲]، محمد فیاضی[۳]

[۱] مهندسی مواد، الکتروسرامیک، دانشگاه یاسوج

[۲] مهندسی مواد، شناسایی و انتخاب مواد، دانشگاه یاسوج

[۳] مهندسی مواد، متالوژی استخراجی، دانشگاه یاسوج

* r.hayati@yu.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۱۷ دی ۱۳۹۷

پذیرش: ۱۲ مرداد ۱۳۹۸

کلید واژه:

پیزوسرامیک BCZT؛ اکسید مس؛ سریا؛ زینتر؛ خواص دی الکتریک

چکیده:

در این پژوهش پیزوسرامیک‌های $(Ba_{0.85}Ca_{0.15})(Zr_{0.1}Ti_{0.9})O_3$ (BCZT) با استفاده از روش متداول زینتر سرامیک‌ها سنتز شدند. به منظور کاهش دمای زینتر و بهبود خواص الکتریکی از افزودنی‌های CeO2 و CuO استفاده گردید و برای وارد کردن این اکسیدها به ترکیب BCZT دو حالت بکار گرفته شد. در حالت اول ۰/۱٪ مولی CeO_2 با مواد اولیه سازنده BCZT ترکیب و موازنه ترکیب مورد نظر طوری انجام شد که Ce^{4+} در مکان Aی ساختار پروسکایت BCZT قرار بگیرد $[(Ba_{0.85}Ca_{0.15})_{0.999}Ce_{0.001}]$ $(Zr_{0.1}Ti_{0.9})O_3$]: BCCeZT) و در حالت دوم، ۰/۱٪ مولی CuO با مواد اولیه ترکیب شد و با در نظر گرفتن اینکه Cu^{+2} وارد مکان Bی ساختار می‌شود، فرمول $(Ba_{0.85}Ca_{0.15})[(Zr_{0.1}Ti_{0.9})_{0.999}$ $Cu_{0.001}]O_3$:BCCuZT نوشته شد. بعد از انجام فرایند کلسیناسیون، مقدار ۰/۰۴٪ وزنی از افزودنی‌های CuO و CeO_2 به ترکیب‌های سنتز شده فوق افزوده شد. اولی به ترکیب BCCeZT اضافه و ترکیب BCCeZT+ 0.04 wt.% CuO ایجاد شد و دومی با اضافه شدن به ترکیب BCCuZT ترکیب BCCuZT + 0.4 wt% CeO_2 را تشکیل داد. این چهار ترکیب در دمای ۱۳۵۰°C زینتر شدند و ریزساختار و ترکیب شیمیایی آن‌ها توسط آنالیزهای میکروسکوپ الکترونی روبشی و پراش اشعه X بررسی گردید. تغییرات قطبش و کرنش با میدان الکتریکی توسط مدار سایر-تاور اصلاح شده در فرکانس ۱Hz اندازه گیری شد. تغییرات نفوذپذیری با دما نیز با استفاده از دستگاه LCRمتر مجهز به ستاپ ثبت دما اندازه‌گیری گردید. طبق نتایج بدست آمده، این افزودنی‌ها ضمن کاهش دمای زینتر باعث بهبود رفتار دی الکتریک سرامیک BCZT شدند. ترکیب BCCuZT + 0.04 wt.% Ce دارای بهترین خواص دی الکتریک، فروالکتریک و پیزوالکتریک ε_r=۳۵۸۵، S_{max}=٪۰/۰۴۷ (در میدان ۰/۵kV/mm)، P_r=۱۵C/cm^2 و d_{33}=۹۶۷pm/V بود که در مقایسه با نمونه BCZT خالص خواص الکتریکی بهبود قابل ملاحظه‌ای داشت.*

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-17]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.1.3.1]

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، ترکیب های بر پایه تیتانات زیرکونات سرب ($Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$, PZT) به خاطر خواص پیزوالکتریک و الکترومکانیکی عالی بیشترین کاربرد را در میان مواد پیزوالکتریک داشته‌اند. به خاطر سمی بودن سرب و نگرانی‌های زیست محیطی، تلاش‌های گسترده‌ای برای یافتن ترکیب‌های بدون سرب با خواص الکتریکی مشابه انجام گرفته است [۱]. علی‌رغم این که تیتانات باریم ($BaTiO_3$, BT) اولین ترکیب پیزوالکتریک بدون سرب است که در سال‌های ۴۳-۱۹۴۰ معرفی شد [۲]، در سال‌های اخیر بیشترین حجم مطالعات به خانواده‌های نایوبات‌های قلیایی سدیم-پتاسیم ($(K,Na)NbO_3$) و تیتانات بیسموت-سدیم ($(Bi,Na)TiO_3$) اختصاص یافته است. با این که این دو گروه از خواص پیزوالکتریک بهتری نسبت به تیتانات باریم برخوردار می‌باشند، همچنان در مقایسه با ترکیب‌های بر پایه PZT خواص پیزوالکتریک ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهند [۳].

محلول جامد $(Ba,Zr)TiO_3$-$x(Ba,Ca)TiO_3$(BZT-xBCT) از خانواده تیتانات باریم، ترکیب نوپایی است که با داشتن خواص پیزوالکتریک معادل با PZT به یک رقیب جدی برای پیزوالکتریک‌های پایه سرب تبدیل شده است. در سال ۲۰۰۹، لیو و رن با دست‌یابی به خواص دی‌الکتریک، پیزوالکتریک و فروالکتریک قابل توجه برای ترکیب ($(Ba_{0.85}Ca_{0.15})$ $(Ti_{0.9}Zr_{0.1})$ O_3)، موج جدیدی در توسعه‌ی پژوهش در این خانواده از ترکیب‌های بدون سرب ایجاد کردند[۴]. ضرایب پیزوالکتریک معادل و حتی بزرگتر از انواع PZT نرم (d_{33}>500pC/N و d_{33}*(0.5kV/mm)≈1100pm/V) نشان از توان بالای این ترکیب برای رقابت با ترکیب‌های پایه‌ی سربی دارد. سیستم BCZT نیز همانند سایر پروسکایت‌های فروالکتریک از یک سری معایب برخوردار است که تاکنون نتوانسته جایگزین سیستم‌های فروالکتریک پایه سربی شود. بر خلاف سیستم‌های پایه سربی، ناحیه‌ی مرز فازی PPT[1] در سیستم BZT-BCT شدیداً وابسته به دما است. سایر مشکلات مربوط به این سیستم دمای کوری پایین (~۸۵°C) و دمای زینتر بالای آن (~۱۵۰۰°C) می‌باشند. کمک زینترهایی چون CeO_2 [۵-۷]، Y_2O_3 [۸] و CuO [۹] علاوه بر کاهش دمای زینتر تا ۱۳۵۰°C، ضرایب d_{33} ترکیب BZT-50BCT را نیز حفظ کرده‌اند.

در این تحقیق افزودنی‌های سریم و مس به دو صورت آلاینده و کمک زینتر به ترکیب BCZT اضافه شدند و تاثیر آن‌ها بر کاهش دمای زینتر و ریزساختار و خواص دی‌الکتریک، فروالکتریک و پیزوالکتریک ترکیب BCZT بررسی گردید.

۲- فعالیت‌های تجربی

ترکیب BCZT با استفاده از روش متداول سنتز حالت جامد تهیه شد. مواد اولیه‌ی مورد استفاده که همگی متعلق به شرکت Alfa-Aesar بودند، عبارتند از: کربنات باریم (۹۹/۸٪)، کربنات کلسیم (۹۹/۵٪)، اکسید تیتانیوم (۹۹/۶٪)، اکسید زیرکونیوم (۹۹/۵٪) اکسید مس (۹۹/۵٪) و اکسید سریم (۹۹/۹٪). مواد اولیه طبق فرمولاسیون مورد نظر توزین شدند. در حالت اول ۰/۱٪ مولی CeO_2 با مواد اولیه سازنده BCZT ترکیب و موازنه ترکیب مورد نظر طوری انجام شد

[1] Polymorphic Phase Transition

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-17]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.1.3.1]

که Ce^{4+} در مکان Aی ساختار پروسکایت BCZT قرار بگیرد: $[(Ba_{0.85}Ca_{0.15})_{0.999}Ce_{0.001}]$ $(Zr_{0.1}Ti_{0.9})O_3$ (BCCeZT) و در حالت دوم، ۰/۱٪ مولی CuO با مواد اولیه ترکیب شد و با در نظر گرفتن اینکه Cu^{+2} وارد مکان Bی ساختار می‌شود، فرمول $[(Zr_{0.1}Ti_{0.9})_{0.999}$ $(Ba_{0.85}Ca_{0.15})$ $Cu_{0.001}]$ O_3: BCCuZT نوشته شد. بعد از انجام فرایند کلسیناسیون در دمای ۱۲۵۰°C، مقدار ۰/۰۴٪ وزنی از افزودنی‌های CuO و CeO_2 به ترکیب‌های سنتز شده افزوده شد. اولی به ترکیب BCCeZT اضافه و ترکیب BCCeZT+ 0.04 wt.% CuO ایجاد شد و دومی با اضافه شدن به BCCuZT ترکیب BCCuZT + 0.4 wt% CeO_2 را تشکیل داد. مخلوط سازی و خردایش توسط آسیاب سیاره‌ای درون ظروف استوانه‌ای پلی اتیلنی با استفاده از گلوله‌های زیرکونیایی و در محیط اتانول به مدت ۵ ساعت انجام شد. سپس محتویات ظروف در خشک کن با دمای ۹۰°C به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند و پودرهای سنتز شده با اعمال فشار اولیه به صورت قرص‌هایی با قطر ۱۰mm و ضخامت حدود ۱/۵mm شکل‌دهی شدند و با استفاده از دستگاه اعمال فشار ایزواستاتیک سرد (KCIP303, Iran)، فشار نهایی ۳۰۰MPa بر نمونه‌ها اعمال شد. نمونه‌ها در بوته‌های زیرکونیایی درپوشیده در دمای ۱۳۵۰°C به مدت ۴ ساعت تف جوشی شدند.

شناسایی ساختار بلوری فازهای موجود با استفاده از تکنیک پراش اشعه‌ی X (D8 Advance, Bruker Inc., Germany) با تابش Cu kα، گام‌های ۰/۲° و زمان نگهداری ۱ ثانیه انجام و به کمک نرم افزار X-pert high score فازهای موجود و ساختار بلوری آن‌ها ارزیابی شد. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM (SEM; TESCAN, Vega 3, Czech Republic) سطوح پولیش شده و سونش حرارتی شده نمونه‌های موجود مورد بررسی قرار گرفت. به منظور اندازه‌گیری خواص الکتریکی، سطوح نمونه‌ها با استفاده از خمیر نقره (Silver paste, Gwent group of companies, Gwent, United Kingdom) الکترودگذاری و برای حصول اطمینان از اتصال اهمیک در دمای ۸۰۰°C به مدت ۳۰ دقیقه حرارت دهی شدند. تغییرات کرنش تک قطبی و دوقطبی با میدان الکتریکی توسط مدار سایر-تاور[1] اصلاح شده و مجهز به یک سنسور جابجایی نوری (Model D63, Philtec Inc., Annapolis, USA) با استفاده از از سیگنال‌های مثلثی یک قطبی و دوقطبی ۰/۵ و ۳kV/mm و در فرکانس ۱ هرتز بررسی گردید. تغییرات نفوذپذیری با دما با استفاده از دستگاه ال سی آر متر (LCR Meter 6020, GW Insteak, Taiwan) مجهز به ستاپ اندازه گیری دما در محدوده دمایی ۱۵۰°C-۲۵ اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

شکل ۱ الگوی پراش اشعه‌ی X نمونه‌های BCZT آلاییده شده با سریم و مس در دمای تف جوشی ۱۳۵۰ °C را نشان می‌دهد. تمام پیک‌ها بر اساس الگوی پراش استاندارد تیتانات باریم با ساختارهای تتراگونال، رمبوهدرال و ارتورمبیک و گروه‌های فضایی p۴mm، R۳m و A۲m مشخصه‌یابی شدند. تمام نمونه ها از فاز پروسکایت BCZT تشکیل شده و هیچ فاز ثانویه‌ای در الگوی پراش مشاهده نشد. در نتیجه می‌توان

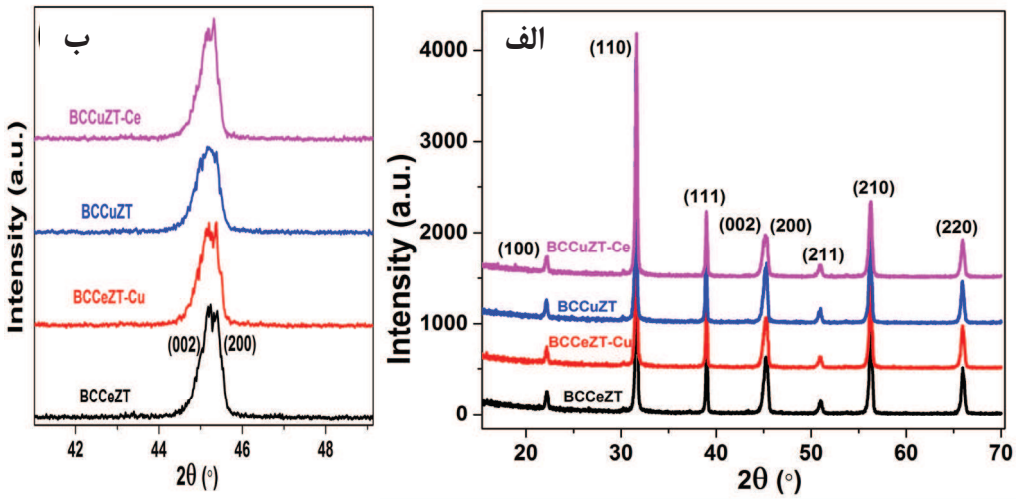
[1] Sawyer Tower

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-17]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.1.3.1]

استنباط کرد که حلالیت Ce و Cu در ترکیب BCZT بیش از مقادیر استفاده شده در این مطالعه می‌باشد. در شکل b-۱ به منظور بررسی دقیق‌تر پیک‌های مشخصه‌ی ساختار، الگوی پراش در بازه °۴۷-۴۴ بسط داده شده است و شکافت این پیک‌ها موید فروالکتریک بودن ترکیب‌ها و هم پوشانی چند پیک در این منطقه می‌باشد که نشان می‌دهند ترکیب BCZT در دمای اتاق از ترکیب حداقل دو ساختار مختلف که معمولاً رمبوهدرال-تتراگونال یا اورتورمبیک-تتراگونال است، تشکیل شده است. به جز نمونه BCCuZT در سه نمونه دیگر به وضوح شکافت پیک °۴۵ قابل رویت می‌باشد. در مورد ترکیب $BCCu_{0.1}ZT$ طبق اظهارات کویی و همکاران اضافه کردن مقادیر ۰/۰۸-۰/۰۶٪ وزنی مس به ساختار BCZT باعث تغییر ساختار به رمبوهدرال می‌شود و در اطراف زاویه $2\theta=45^\circ$ تنها می توان صفحات (۲۰۰) را شناسایی کرد [۷]. اما در نمونه $BCCe_{0.1}ZT+0.04Cu$ تنها ۰/۰۴٪ وزنی مس وارد شده است و حضور همزمان دو فاز فروالکتریک در دمای اتاق با شکافت پیک زاویه °۴۵ تایید می‌گردد. در بررسی دیگر توسط کویی و همکاران [۹]، تاثیر افزودن مقادیر کمتر از ۰/۱٪ وزنی سریم بر خواص الکتریکی BCZT بررسی شد. طبق نتایج XRD در این ترکیب‌ها در همه مقادیر دو فاز تتراگونال و رمبوهدرال همزمان در ساختار وجود دارند که با نتایج بدست آمده در این تحقیق هم خوانی دارد.

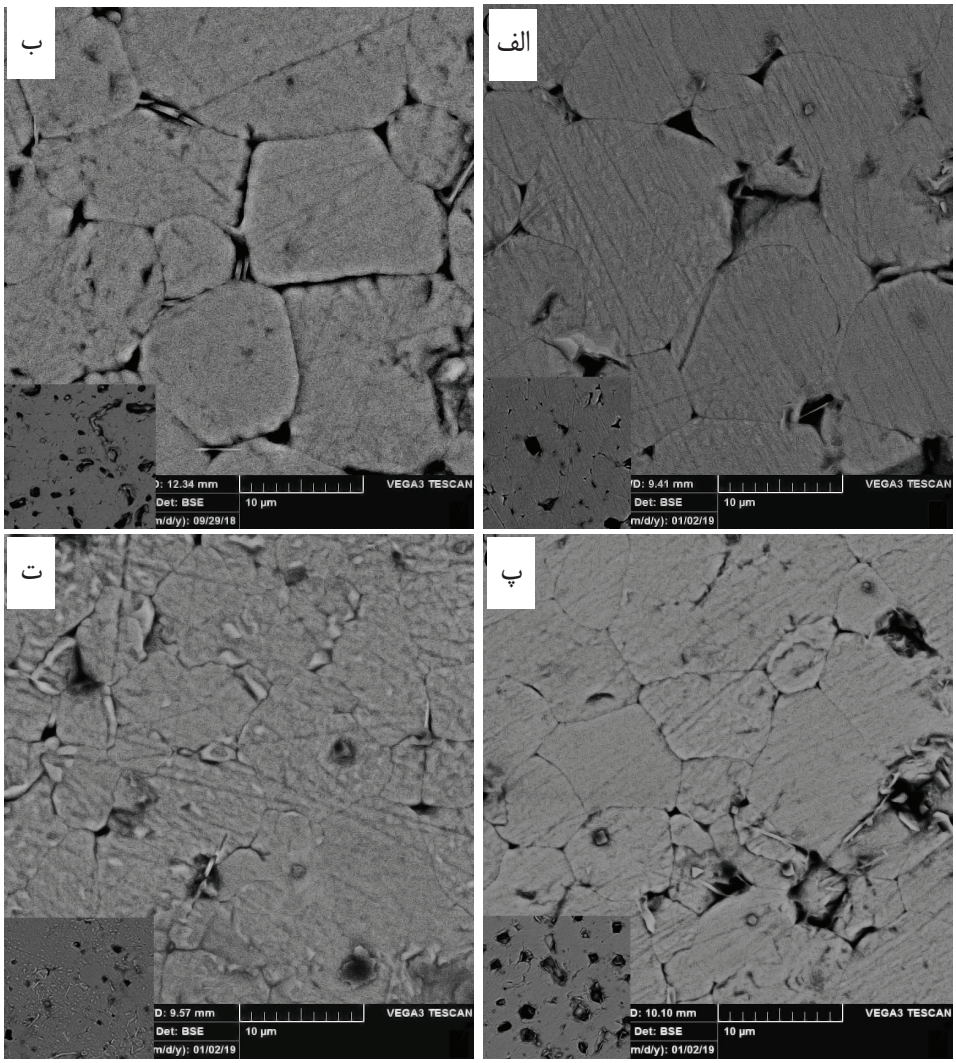
شکل ۲ تصاویر SEM مربوط به نمونه‌های BCZT آلاییده شده با سریم و مس را با هم مقایسه می‌کند. تصاویر با بزرگنمایی کمتر در داخل اشکال برای مقایسه میزان تخلخل‌ها نشان داده شده‌اند. این تصاویر از سطوح پولیش و سونش حرارتی شده‌ی این نمونه‌ها تهیه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه‌های BCCeZT و BCCeZT-Cu در مقایسه با نمونه های بر پایه مس ریزساختار دانه درشت‌تری دارند. طبق شکل b-۲، اضافه کردن مس به نمونه BCCeZT باعث افزایش تخلخل‌های ساختار شده است، اما شکل d-۲نشان می‌دهد که با اضافه شدن سریم به نمونه BCCuZT تخلخل‌های ریزساختار کمتر شده است و یک سرامیک متراکم ایجاد شده است.



شکل ۱- الف) الگوی پراش اشعه‌ی X نمونه‌های BCZT حاوی سریم و مس که در دمای °C ۱۳۵۰ تف جوشی شدند، ب) پیک گسترده شده زوایای $2\theta=44-47^\circ$

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-17]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.1.3.1]



شکل ۲- تصاویر SEM سطوح سونش حرارتی شده نمونه‌های
الف) BCCeZT، **ب)** BCCeZT+Cu، **پ)** BCCuZT **و ت)** BCCuZT+Ce **زینتر شده در دمای ۱۳۵۰°C.**

شکل ۳ تغییرات خواص دی الکتریک ε و tanδ با دما برای نمونه‌های BCZT اصلاح شده با سریم و مس در بازه‌ی دمای محیط تا ۱۵۰°C و در فرکانس ۱kHz را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود ماکزیمم مقدار ثابت دی‌الکتریک به جز ترکیب BCCuZT+Ce برای تمام نمونه‌های تقریباً یکسان است. از طرفی مقادیر دمای کوری با افزودن مس به ترکیب اولیه BCZT کاهش یافته است و نمونه‌های بر پایه سریم (BCCeZT و BCCeZT+Cu) دماهای کوری بالاتری دارند. این رفتار بخاطر جانشینی مس بعنوان یک آلاینده پذیرنده[1] در مکان‌های B ساختار و ریزساختار دانه ریزتر نمونه‌های بر پایه مس می‌باشد [۱۰ و ۱۱]. در مقابل افزودن سریم در مکان‌های Aی ساختار BCZT با ایجاد یک پیزوالکتریک نرم[2] باعث افزایش نسبی

[1] Acceptor
[2] Soft Piezoelctric

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-17]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.1.3.1]

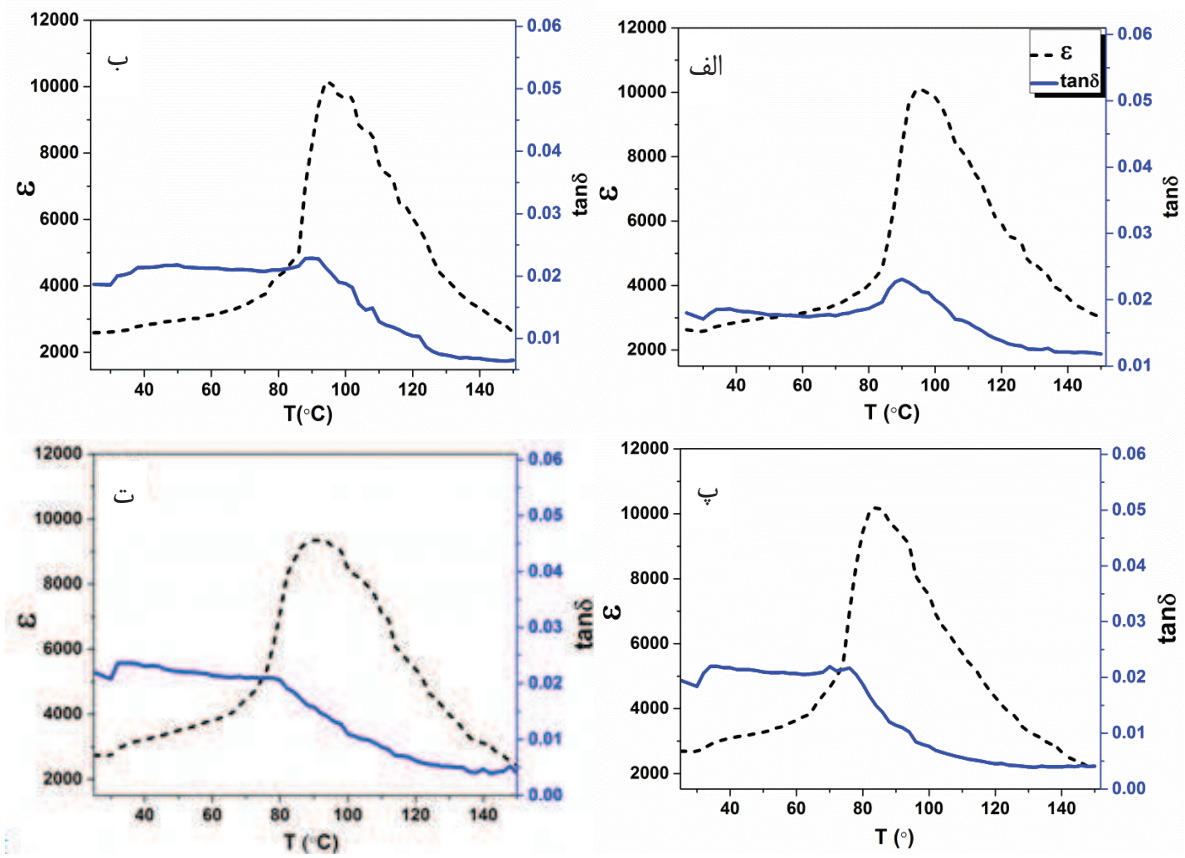
اندازه دانه و بیشتر شدن دمای کوری شده است. معادلات تعادل بار بصورت زیر می‌باشند:

$$BCCuZT: Cu''_{\frac{Ti}{Zr}} + V_{\ddot{O}}$$

$$BCCuZT: Ce^{\cdot}_{\frac{Ba}{Ca}} + V''_{\frac{Ba}{Ca}}$$

در نمونه آلاییده شده با مس، پس از جانشینی Cu^{2+} در مکان‌های Bی ساختار BCZT، جاهای خالی اکسیژنی برای جبران بار ایجاد می‌شود که باعث القای رفتار پیزوالکتریک سخت می‌شود و در نمونه‌های آلاییده شده با Ce^{4+} با جانشینی سریم در محل‌های Aی ساختار، جاهای خالی باریم یا کلسیم ایجاد می‌شود که باعث ایجاد خاصیت پیزوالکتریک نرم می‌شود.

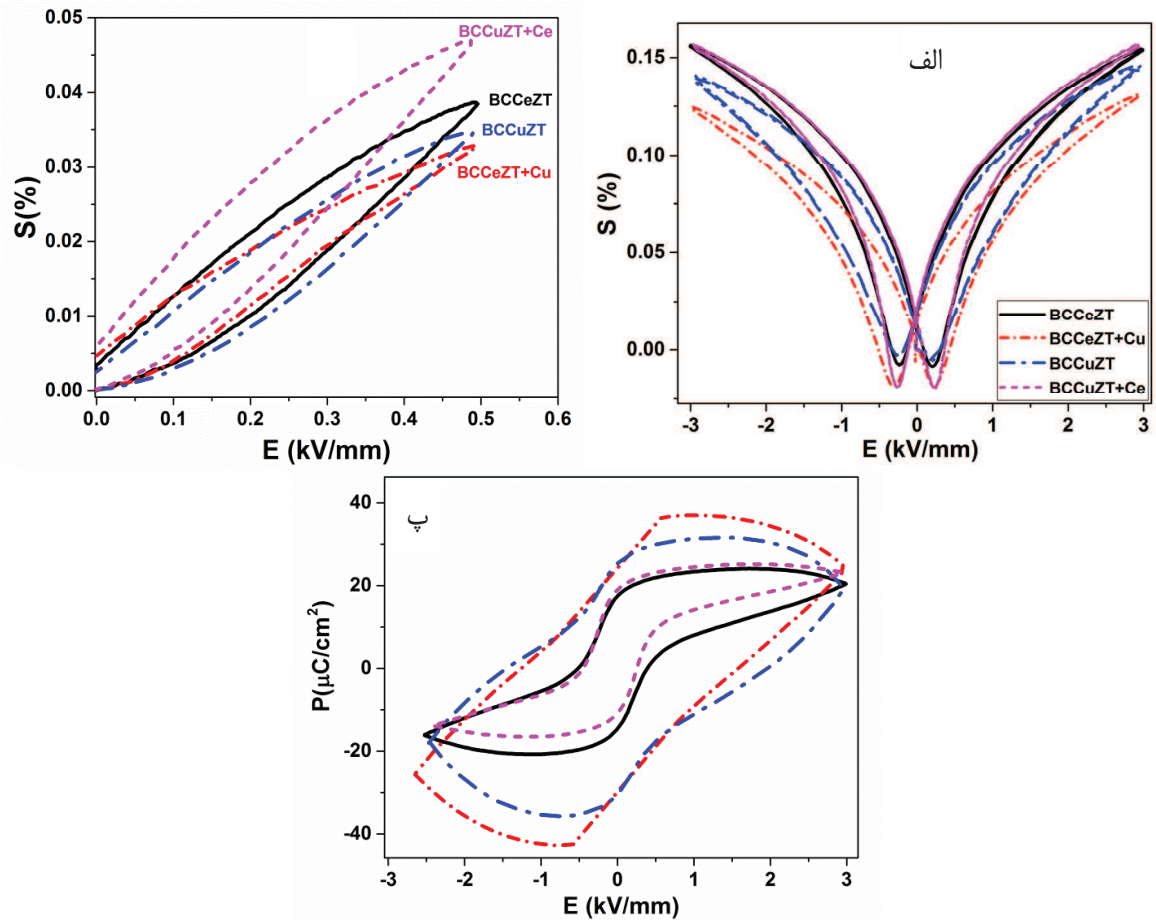
شکل ۴ (الف تا ت) منحنی‌های کرنش-میدان تک قطبی و دو قطبی و منحنی‌های هیسترزیس قطبش-میدان در حالت دوقطبی برای نمونه‌های BCZT آلاییده شده با سریم و مس را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود افزودن مس به نمونه BCCeZT باعث کاهش ماکزیمم مقدار کرنش تک قطبی و دو قطبی شد، اما در مقابل اضافه کردن سریم به ترکیب BCCuZT باعث بهبود قابل توجه رفتار ماده گردید و کرنش ماکزیمم برای این ترکیب با افزایش قابل ملاحظه‌ای همراه بود.



شکل ۳- تغییرات نفوذپذیری دی الکتریک و فاکتور اتلاف با دما در فرکانس اندازه گیری ۱kHz برای ترکیب‌های الف) BCCeZT، ب) BCCeZT+Cu، پ) BCCuZT و ت) BCCuZT+Ce در دمای زینتر ۱۳۵۰°C.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-17]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.1.3.1]



شکل ۴- نمودارهای هیسترزیس کرنش-میدان در حالت تک قطبی (الف) و دوقطبی (ب) و قطبش-میدان دو قطبی (پ) در فرکانس اندازه‌گیری ۱Hz برای نمونه‌های BCZT اصلاح شده با سریم و مس در دمای زینتر ۱۳۵۰°C.

همان‌طور که در قسمت قبل گفته شد، حضور آلاینده‌های پذیرنده مثل مس، با ایجاد جاهای خالی اکسیژنی باعث سخت شدن رفتار ماده می‌شود و انتظار می‌رود مقادیر کرنش با کاهش همراه باشد، که در مورد نمونه BCCuZT این رفتار مشاهده شد. اما اضافه کردن یک افزودنی دهنده مثل سریا شرایط را بهبود داده و با حذف جاهای خالی اکسیژنی از ترکیب BCCuZT یک پیزوالکتریک نرم ایجاد کرده است و افزایش کرنش ماکزیمم در نمونه BCCuZT+Ce به خوبی موید این رفتار می‌باشد. در مقابل افزودن یک آلاینده پذیرنده (مس) به ترکیب BCCeZT که قبلاً با جانشینی سریم در مکان‌های Aی ساختار به یک پیزوالکتریک نرم تبدیل شده بود، باعث افت خواص پیزوالکتریک شده است. منحنی‌های هیسترزیس قطبش شکل ۴-c در نمونه‌های BCCeZT+Cu و BCCuZT به حالت اشباع نرسیده‌اند که این امر حکایت از هدایت الکتریکی ناشی از وجود تخلخل ها و جاهای خالی اکسیژنی در این سرامیک‌ها دارد که باعث عبور جریان از نمونه و مانع از رسیدن قطبش به حالت اشباع شده است. همین امر باعث کم شدن مقدار کرنش تک قطبی در این نمونه‌ها در مقایسه با دو نمونه دیگر گردیده است.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-17]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.1.3.1]

جدول ۱- خلاصه خواص الکتریکی نمونه‌های BCZT آلاییده شده با سریم و مس در دمای زینتر ۱۳۵۰°C.

نام ترکیب	ε_r @ R.T	tanδ @ R.T	T_C(°C)	S_{max} @ 0.5 kV	d_{33}^* @ 0.5 kV	مرجع
BCZT	۲۶۶۲	۰/۰۲۸	۹۱	۰/۰۳۷	۷۷۰	[۱۲]
BCCeZT	۲۷۲۲	۰/۰۱۹	۹۶	۰/۰۴۱	۷۹۳	این کار
BCCeZT+Cu	۲۸۷۵	۰/۰۴	۹۲	۰/۰۳۳	۶۶۶	این کار
BCCuZT	۲۷۱۲	۰/۰۲۶	۸۴	۰/۰۳۵	۷۱۶	این کار
BCCuZT+Ce	۳۵۸۵	۰/۰۲۷	۸۸	۰/۰۴۷	۹۶۷	این کار

جدول ۱ خلاصه خواص الکتریکی نمونه‌های BCZT اصلاح شده با سریم و مس را نشان می‌دهد. طبق این جدول بیشترین مقدار ثابت دی الکتریک در دمای اتاق به نمونه BCCuZT+Ce تعلق داشت که به خوبی با اطلاعات مربوط به رفتار فروالکتریک این نمونه موافق می‌باشد و این نمونه دارای بیشترین مقدار کرنش تک قطبی و بالاترین ضریب پیزوالکتریک معکوس d_{33}^* بود. دمای کوری این ترکیب اگرچه از دمای کوری BCZT خالص کمی کمتر می‌باشد، اما در مقایسه با ترکیب BCCuZT مقدار بالاتری داشته است. این امر نشان می‌دهد که اضافه کردن مقدار بسیار کمی سریا (۰/۰۴٪) به ترکیب BCCuZT باعث بهبود رفتار دی الکتریک، فروالکتریک و پیزوالکتریک این ترکیب شده است. از طرفی افزودن مس به ترکیب BCCeZT ضمن کاهش دمای کوری باعث کاهش خواص فروالکتریک و پیزوالکتریک این ترکیب شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پیزوسرامیک‌های بدون سرب BCZT آلاییده شده با سریم و مس با استفاده از روش متداول سرامیک‌ها سنتز شدند. اثر افزودن سریم و مس به تنهایی و همزمان بر ریزساختار، خواص دی الکتریک، فروالکتریک و پیزوالکتریک این سرامیک‌ها مطالعه شد. بررسی ساختار فازها با استفاده از آنالیز پراش اشعه‌ی X، وجود فاز پروسکایت خالص بدون هیچ گونه فاز ثانویه را تایید کرد. نتایج SEM نشان داد که نمونه‌های آلاییده شده با سریا در مقایسه با نمونه‌های بر پایه مس ساختار دانه درشت تر و متراکم‌تری داشتند و افزودن سریم به ترکیب BCCuZT ضمن اصلاح ریزساختار باعث افزایش ثابت دی الکتریک در دمای اتاق، بهبود کرنش ماکزیمم در حالت تک قطبی و افزایش ضریب پیزوالکتریک سیگنال بزرگ d_{33}^* گردید. بالاترین ضرایب دی‌الکتریک، فروالکتریک و پیزوالکتریک ε_r=۳۵۸۵، S_{max}=٪۰/۰۴۷ (در میدان ۰/۵kV/mm)، P_r=۱۵C/cm^2 و d_{33}^*=۹۶۷pm/V برای ترکیب BCCuZT+Ce در دمای زینتر ۱۳۵۰°C حاصل شد که نسبت به BCZT خالص در همین دما بهبود قابل ملاحظه‌ای داشته است.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-17]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.1.3.1]

مراجع

[1] J. Rödel, W. Jo, K. T. P. Seifert, E. M. Anton, T. Granzow, and D. Damjanovic, "Perspective on the development of lead-free piezoceramics," Journal of the American Ceramic Society, vol. 92, pp. 1153-1177, 2009.

[2] L. E. Cross and R. E. Newnham, "History of Ferroelectrics," in Ceramics and civilization: High-technology ceramics-Past, present and future vol. III, W. D. Kingery, Ed., ed. USA: The American Ceramic Society Inc., 1986.

[3] J. Rödel, K. G. Webber, R. Dittmer, W. Jo, M. Kimura, and D. Damjanovic, "Transferring lead-free piezoelectric ceramics into application," Journal of the European Ceramic Society, vol. 35, pp. 1659-1681, 2015.

[4] W. Liu and X. Ren, "Large piezoelectric effect in Pb-free ceramics," Physical Review Letters, vol. 103, p. 257602, 2009.

[5] Chandrakala, E., et al., Strain-Induced Structural Phase Transition and its Effect on Piezoelectric Properties of (BZT-BCT)-(CeO_2) Ceramics. Journal of the American Ceramic Society, 2016. 99(11): p. 3659-3669.

[6] Chandrakala, E., J.P. Praveen, and D. Das, Effect of poling process on piezoelectric properties of BCZT – 0.08 wt.% CeO_2 lead-free ceramics. AIP Conference Proceedings, 2016. 1728(1): p. 020502.

[7] Cui, Y., et al., Lead-free $(Ba_{0.85}Ca_{0.15})(Ti_{0.9}Zr_{0.1})O_3$–$CeO_2$ ceramics with high piezoelectric coefficient obtained by low-temperature sintering. Ceramics International, 2012. 38(6): p. 4761-4764.

[8] Cui, Y., et al., Lead-free ($Ba_{0.85}Ca_{0.15}$ ( )$Ti_{0.9}Zr_{0.1}$) O_3-Y_2O_3 ceramics with large piezoelectric coefficient obtained by low-temperature sintering. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2013. 24(2): p. 654-657.

[9] Cui, Y., et al., Lead-free $(Ba_{0.7}Ca_{0.3})TiO_3$-$Ba(Zr_{0.2}Ti_{0.8})O_3$-xwt٪ CuO ceramics with high piezoelectric coefficient by low-temperature sintering. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2012. 23(7): p. 1342-1345.

[10] C. A. Randall, N. Kim, J.-P. Kucera, W. Cao, and T. R. Shrout, "Intrinsic and Extrinsic Size Effects in Fine-Grained Morphotropic-Phase-Boundary Lead Zirconate Titanate Ceramics," Journal of the American Ceramic Society, vol. 81, pp. 677-688, 1998.

[11] Jigong Hao, Wangfeng Bai, Wei Li, and J. Zhai, "Correlation between the microstructure and electrical properties in high-performance $(Ba_{0.85}Ca_{0.15})(Zr_{0.1}Ti_{0.9})O_3$ lead-free piezoelectric ceramics," Journal of the American Ceramic Society, vol. 95, pp. 1998-2006, 2012.

[12] Hayati, R., et al., Effects of Bi_2O_3 additive on sintering process and dielectric, ferroelectric, and piezoelectric properties of $(Ba_{0.85}Ca_{0.15})(Zr_{0.1}Ti_{0.9})O_3$ lead-free piezoceramics. Journal of the European Ceramic Society, 2016. 36(14): p. 3391-3400.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-17]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.1.3.1]